

# 小型船舶电站系统调试及系泊试验

左鼎<sup>1</sup>, 李超<sup>2</sup>, 柏君励<sup>1</sup>, 王杰<sup>1</sup>, 吴汉波<sup>1</sup>

(1. 武昌船舶重工集团有限公司, 湖北 武汉 440060; 2. 南部战区海军某登陆舰支队, 广东 湛江 524000)

**摘要:** 电站系统是船舶最主要的系统之一, 电站系统的调试试验是系泊试验的重要内容。本文根据船舶电站系统系泊试验相关规范要求, 结合某小型船舶电站系统调试和系泊试验中遇到的问题, 详细论述了电站系统系泊试验的准备工作、试验流程、试验方法和注意事项, 供相关技术人员参考, 以确保电站系统试验顺利进行, 各项性能指标满足试验册及相关标准规范的要求。

**关键词:** 船舶电站; 系泊试验; 稳态特性; 瞬态特性; 电站监控

**中图分类号:** U665.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2021) 12—0062—04

船舶电站系统<sup>[1]</sup>包括柴油发电机组、主配电系统和电站监控装置等, 是船舶的电力来源, 为船上电气设备提供电源。在系泊试验阶段需进行电站系统的调试及试验<sup>[2]</sup>, 尤其是对于新设计的船型, 若电站系统上船前未进行联调, 则调试期间可能出现各种故障、问题<sup>[3-4]</sup>。通过对电站系统的调试, 确保各设备间接口正确、信号畅通, 保证发电机组及电站监控设备工作的可靠性、稳定性和协调性, 为船舶供电质量和航行安全提供保障。

某小型新研船舶配置 2 台额定功率为 90kW、额定电压为 390V 的三相交流无刷同步发电机, 电站系统部分设备为新研产品, 各设备上船前未进行联调。本文结合该船的电站系统调试及系泊试验, 详细论述调试试验

的流程和方法。同时, 对调试过程中可能存在的故障问题进行简要的探讨和分析, 以供相关人员参考。

## 1 试验前准备工作

系泊试验前, 由试验牵头单位组织召开船舶电站系泊试验协调会, 明确试验的流程、职责分工、站位安排等。技术人员进行试验技术交底, 专职安全管理人员宣讲试验过程中的安全注意事项及应急预案等。

同时还应做好下列准备工作:

(1) 技术资料准备。主要包括: 电力一次、电力二次、电站监控、直流供电电气系统图和相应接线图, 柴油发电机组、主配电板、电站监控装置、蓄电池和自

泵的型选应遵循以下原则: ①使所选泵的形式和性能应符合装置流量、扬程、压力、温度等工艺参数的要求; ②应满足工质特性的要求; ③机械方面可靠性高; ④经济上要综合考虑设备费用、运转费、维修费和管理费的总成本最低。

## 5 结语

全世界对 LNG 的需求量正不断逐年走高, 国外各大能源企业与造船企业纷纷联合, 投入对海上浮式 LNG 储存装置的研发与更新。相较于国外, 国内 FLNG 方面的研究起步较晚。对 FLNG 液货系统的研究有助于强化我国的能源战略, 提高我国造船水平, 打破国外对我们的技术垄断, 对其研究分析将大步推进我国 FLNG 船舶

的国产自主化进程。

参考文献:

- [1] 液化天然气浮式生产储卸装置研究进展 [J], 马华伟, 刘春杨, 徐志诚.
- [2] FLNG 液化工艺的关键技术 [J], 李玉星, 朱建鲁, 王武昌.
- [3] 浮式液化天然气液化工艺综述 [J], 王春节, 魏林瑞, 张磊.
- [4] 浮式液化天然气技术综述 [J], 夏丹, 郑云萍, 李剑锋.

动充放电装置等设备（或系统）的技术、使用和维修说明书、试验册等；

（2）调试仪表准备。准备试验用仪器及设备（万用表、兆欧表、相序表、转速表、秒表、干式负载电阻箱等）；

（3）调试前检查。电工检查发电机组、主配电板、电站监控等设备安装，保证设备安装牢固；参照接线图检查电气设备之间的接线；铭牌、标牌等完整性检查、相序一致性检查、接地检查、热继电器整定值检查等。钳工确保燃油、机油、冷却水、排气管路清洁、畅通。管路必须排列有序、连接牢固、密封可靠。

## 2 系泊试验过程

船舶电站系泊试验包括绝缘电阻测量、机组安全保护及监测报警、机组负载试验、机组调压特性试验、电站试验等。

### 2.1 绝缘电阻测量

绝缘电阻测量分为冷态绝缘电阻测量和热态绝缘电阻测量。冷态绝缘电阻在试验前测量，热态绝缘电阻在试验结束后测量。

系泊试验开始后，设备运行前应测量主要电气设备的冷态绝缘电阻。用兆欧表（500V）测量发电机组（发电机组定子绕组、发电机组防冷凝加热器、辅机淡水预热装置、机油预供泵电动机、机旁控制箱等）、主配电板（汇流排对地及汇流排之间）和干式负载箱的冷态绝缘电阻。其中，发电机测量冷态绝缘电阻前控制器电源必须断开，电机绕组应全部放电，对地电位相同的电路应相连，对地电位不同的电路应断开。若发现冷态绝缘电阻值（20℃时，冷态绝缘电阻 $\geq 2M\Omega$ ）过低，应接通电加热器开关，加热绕组、驱除潮气、提高绝缘，保证绝缘电阻值满足规范要求后才能开展下一步试验。

在测量冷态绝缘电阻时，需重点关注干式负载电阻箱的冷态绝缘电阻值。通常，干式负载电阻箱是露天存放在趸船上，如果受潮或雨淋将导致干式负载电阻箱的冷态绝缘电阻降低或为零，不能满足系泊试验要求。因此，干式负载电阻箱在试验过程中，既要打开散热盖及时充分散热，又要做好防雨防潮措施，防止干式负载电阻箱的冷态绝缘电阻降低。

### 2.2 机组安全保护及监测报警试验

绝缘电阻测试完毕后，进行机组安全保护及监测

报警试验。

柴油发电机组安全保护系统设计如下报警功能：机组超速保护、滑油压力过低、紧急停车（机旁）、紧急停车（主配电板）、发电机绕组温度过高、滑油压力低、冷却水温高 7 个报警点。

柴发机组监测系统设计如下报警功能：冷却水温度高、机油温度高、机油压力低、燃油泄漏、蓄电池电压低、淡水压力低、机油压力过低和超速报警停机 8 个报警点。

除紧急停车试验需在发电机起机的工况下进行外，其它安全及监测报警试验均在停机工况下通过短接接线和使用模拟方法（压力传感器校验仪、PTC 温度控制器等）实现上述故障报警。开关量直接用短接和断开线路进行模拟。部分模拟量直接修改采集参数进行模拟。当出现故障报警时，能在发电机组机旁控制箱发出声光报警，并同步在主配电板发出声光报警及电站监控装置显示屏上显示报警信息。当测量值超过规定值范围时，需检查排除故障。进行此试验时，须有设备厂家技术人员配合完成相关工作，如有故障，需及时查清原因并排除故障。

### 2.3 机组负载及并联运行试验

安保及监测报警试验结束后，进行发电机组带载试验。试验采用干式负载电阻箱（最大负载 4500kw）作为负载。将干式负载电阻箱通过电缆连接到主配电板汇流排，将电阻箱信号线连接至笔记本电脑，通过电脑软件控制负载加减操作及功率因数设置。

准备工作完成后，开始进行柴油发电机单机带载试验。分别给 1、2 号发电机组依次加 25%、50%、75%、100%、110% 负载，各个负载工况下，记录滑油温度及压力、冷却水温度、排气温度、电压、电流、功率因数、频率等参数值。在调节负载值时，应平稳缓慢有规律调整，不应跨度过大，且不得跳跃加载，避免损坏柴油发电机。其中，25%、50%、75% 负载需各运行 10 分钟，100% 负载需运行 4 小时，110% 负载需运行 1 小时。带载试验过程宜连续进行，不间断，以检验发电机组运行时各项性能参数的可靠性和稳定性。100% 负载结束后，应测量发电机各部分的热态绝缘电阻值。当出现记录数据与标准值相差太大时，或者负载脱落时，应立即停机检查，查找原因，排除故障，重新进行负载试验。

试验中, 电流会由滞后变为超前, 此时, 功率因数由感性变为容性。为保证电流的滞后状态, 应调整主配电板的调压器, 使功率因数维持在 0.8 左右 (滞后)。

单机负载试验结束后, 在保证试验结果正常的情况下, 进行发电机组并车试验, 以 20% 额定负载为基准点, 通过负载控制软件调节并联机组的负载, 使有功功率和无功功率分配基本一致, 均功后不允许进行二次调节, 然后单方向改变负载, 20% → 50% → 75% → 100% → 75% → 50% → 20%, 保持负载功率因数为 0.8 左右, 运转一定时间, 测量并记录每台发电机的有功功率、电压、功率因数、电流和频率。有功功率及无功功率的分配需满足试验要求。

## 2.4 机组调压特性试验

机组负载试验结束后, 保证试验结果符合要求的情况下, 进行机组调压特性试验。机组调压特性试验分为稳态调压率和瞬时电压调整率。

### 2.4.1 机组稳态调压率及电压调整率的测定

通过稳态调速率的检查, 确定机组的稳态调速率范围。柴油发电机组在调定的稳态调速率下稳定运行, 在额定负载时通过调节主配电板的电位器将电压整定为额定电压, 保持功率因数 0.8 (滞后), 调节负载控制软件使机组负载从额定负载到空载 (按照 100% → 75% → 50% → 20% → 0 顺序调节负载), 再从空载到额定负载 (按照 0 → 25% → 50% → 75% → 100% 顺序调节负载), 单方向缓慢变化, 其测点不少于 5 点, 并包括 25% 额定负载点, 记录各点的负载, 电流、电压和频率值。在功率因数 0.8 (滞后) 时, 测量各个测点的稳态电压波动率。试验结果中稳态电压调整率  $|\delta u| \leq 2\%$ , 且所有机组的稳态调压率基本一致; 稳态电压波动率应不超过平均电压的  $\pm 0.5\%$ 。注意: 功率因数为 0.6 (滞后)、0.9 (滞后) 时, 额定负载需重新计算。具体计算方法为: 通过功率因数 0.8 (滞后) 时的额定功率  $P$  (此功率为有功功率, 值为 90kW) 计算出视在功率  $S$ , 视在功率  $S$  为 112.5 kW。功率因数为 0.6 (滞后) 时, 用视在功率  $S$  乘以相应的功率因数得到额定负载为 67.5kW; 功率因数为 0.9 (滞后) 时, 用视在功率  $S$  乘以相应的功率因数得到额定负载为 101.25kW。然后按照功率因数 0.8 (滞后) 时的试验步骤分别重复上述测试。

### 2.4.2 瞬时电压调整率测定及恢复时间测定

在机组的稳态调压率测定后, 开始进行瞬时电压调整率测定试验。将柴油发电机组运行在额定转速 (1500r/min) 和接近额定电压 ( $U_N$  为 390V) 的空载状态下, 施加一个功率因数不超过 0.4 (滞后)、阻抗标幺值为 2 的三相平衡负载 (额定功率为 90 kW 的三相交流无刷同步发电机, 经计算可得, 施加的电流为 100A, 施加的负载为 27kW), 调节负载控制软件, 输入负载为 27kW, 待机组带载运行稳定后突卸该负载, 记录三相电压和相电流的变化, 记录时间不少于 10s。为减少单次试验带来的误差, 对瞬时电压调整率测定试验连续进行 3 次, 记录试验结果并求取平均值。试验结束后, 试验结果需满足以下要求: 发电机输出端的电压跌落突加该负载时, 最低不超过  $-14\%U_N$ , 突卸负载时, 最高不超过  $+20\%U_N$ ; 电压恢复并保持与最终额定电压的偏差  $\pm 1\%U_N$  (或  $3\%U_N$ ) 以内, 所需时间不超过 1s (或设定的 0.75s)。

## 2.5 电站监控系统试验

电站监控系统设有: 手动、半自动、自动三种控制方式, 在主配电板上设置控制方式转换面板, 对控制方式进行选择。控制方式的优先顺序为: 手动 > 半自动 > 自动, 系统发生故障时, 不应影响手动功能。电站监控系统试验包括半自动控制功能试验、调频调载试验和自动控制方式试验。

### 2.5.1 试验前准备工作

在试验之前, 由电站监控装置设备厂家技术人员根据接口协议, 调试电站监控装置的程序, 使得电站监控装置、主推进监控装置延伸报警箱和驾控台监视屏之间能够同步接收和显示安全及监控报警信号、发电机组参数信息等。

用兆欧表 (量程 500V) 测量电站监控装置的电源输入端与地的冷态绝缘电阻和热态绝缘电阻, 其阻值均应符合相关标准规范要求。检查各报警点报警的正确性和可靠性, 检查各测量点的测量精度, 电压、电流、功率的测量精度不大于满量程的  $\pm 2.5\%$ , 其他模拟量精度为 1%。

### 2.5.2 半自动控制功能试验

在各项指标满足要求后, 开始进行半自动控制功能试验, 将发电机组机旁控制箱的控制位置选择开关置于“遥控”处, 主配电板上的控制方式的选择开关置于“半自动”位置, 通过发电机组操纵面板 (安装于主配

电板)上的按键人工手动进行启动、合闸、分闸、停机  
等控制试验,检查控制功能的正确性和可靠性。

### 2.5.3 调频调载试验

半自动控制试验完成后,进行调频调载试验。在  
负载控制软件上设置功率因数为0.8(滞后),额定  
功率为90kW,负载值设定顺序为20%、50%、75%、  
100%、75%、50%、20%,除100%负载运行10分钟外,  
其他负载运行5分钟。试验过程中记录各机组的有功功  
率、频率和功率因数。试验结果需满足下列要求:单机  
运行时,稳频精度为 $50 \pm 0.5\text{Hz}$ ;双机并联运行时,有  
功分配精度 $\leq \pm 5\%P_e$ ,稳频精度为 $50 \pm 0.5\text{Hz}$ 。

### 2.5.4 自动控制方式试验

试验时,将发电机组机旁控制箱的控制位置选择  
开关置于“遥控”处,主配电板上的控制方式的选择开  
关置于“自动”位置。自动控制方式,指系统通过电站  
监控软件对柴油发电机组进行自动控制,对机组的状态  
变化及故障进行自动处理,实现系统的全自动运行。自  
动控制方式试验包括自动起动及自动解列和停车两项试  
验。

(1)柴油发电机组自动起动。当电网失电时,电  
站监控系统将起动全部备用机组,先建压(大于额定电  
压的85%,频率为 $50 \pm 0.5\text{Hz}$ )机组投网;当电网负荷  
增加至在网柴油发电机组额定总功率的90%,且持续  
30秒时,电站监控系统将起动备用机组自动投网;当  
机组发生一类故障时,电站监控系统发出声光报警,并  
立即对故障机组解列、停车,同时自动起动并投入备用  
机组;当机组发生二类故障时,电站监控系统发出声光  
报警,同时自动起动并投入备用机组,故障机组自动进  
行负载转移、解列和停车;具有三次起动功能,机组起  
动指令的发出不得超过三次,当三次起动均未成功时,送  
出起动失败信号并锁止再次起动。

(2)柴油发电机组自动解列和停车。当电网负荷  
减小至在网机组30% $P_e$ 以下时,指定机组能自动解列,  
并延时1min停车;在系统执行功率减机功能前,可通  
过控制方式转换面板上“1#优先减机”按钮指定1#柴  
油发电机组优先解列,系统默认2#机组优先减机。机  
组解列时,当负载转移至10% $P_e$ 以下发出分闸信号;  
机组解列时,若电网总负载又大于在网发电机组的  
90% $P_e$ ,则自动取消解列指令,并重新进入调频调载;  
在解列过程中,除一类故障外,均能平滑的转移负荷。

## 3 系泊试验注意事项

(1)试验区域内不得安排烧焊、切割、打磨、涂  
刷油漆等影响试验的工作;

(2)在参试设备周围安放固定的、明显的安全警  
示标志,并在试验过程中有专人看护,禁止非相关人员  
的接近;

(3)试验前,电工操作人员需提前进行干式负载  
控制软件的培训,确保试验顺利进行;

(4)设备接线、维修及保养需在停机、断电的情  
况下进行,严禁带电操作;

## 4 结语

本文对船舶电站系泊试验的流程、方法进行详细  
论述,对试验过程中的常见问题和注意事项进行分析和  
探讨,以供相关人员参考和借鉴。对于新设计研发的船  
型,在开展系泊试验前还需重点开展各设备间的对接接  
口检查,以确保接口间通信畅通、信号传递无误。

### 参考文献:

- [1]何首贤,邢迎春.船舶电站供配电系统的研究[J].中国水运.2013/07.
- [2]陈玉华.船舶电站系泊调试[J].船舶机电设备.2012/01:58~62.
- [3]李腾腾.船舶电站系统管理及故障排除[J].中国水运.2021/08.
- [4]杨冬.船舶电站并车与故障探讨[J].中国水运.2010/03.

